

W120 行動素アプローチによる心的負担を考慮したロボットマニピュレータの動作計画

Trajectory planning of robot manipulators taking account of mental stress via motion element approach

○ 正 花島 直彦 (室蘭工大) 正 山下 光久 (室蘭工大)
正 疋田 弘光 (室蘭工大)

Naohiko HANAJIMA, Muroran Inst. of Tech., 27-1, Mizumoto-cho, Muroran

Mitsuhisa YAMASHITA, Muroran Inst. of Tech.

Hiromitsu HIKITA, Muroran Inst. of Tech.

This paper deals with the trajectory planning problem of robot manipulators taking account of mental stress of the users via motion element approach. In motion element approach, a motion of the robot manipulator is divided into fundamental elements, and each element is given the mental stress index, then the elements combined into a motion trajectory such that the sum of the mental stress indices are minimized. The mental stress indices are obtained from the heart rate variability analysis in the time domain. In experiments, we prepare over 100 motion elements, present them to subjects, and analyze the ECG data of the subjects. Examples of the trajectory planning problem are shown.

Key Words: Motion element, HRV, RRV, robot manipulators, trajectory planning, mental stress

A1. はじめに

本稿では人の身近で動くロボットマニピュレータが、使用者に心的負担を与えないような動作を行うための動作計画手法の一つとして、行動素アプローチを提案する。

近年、メカトロニクス技術やコンピュータ技術の進歩により、より複雑な機能を持つロボットを作ることが可能になっており、さらに、少子高齢化による労働人口不足の観測とあいまって、ロボットを人間の生活空間で利用したいという要求が大きくなっている。このような人間と接近した環境で動くロボットは、動作中に人間に心理的影響を与える。この心理的影響について調べ、その結果をロボットの動作の生成に活かすことができれば、使用者の心的な快適性を確保することが可能になる。本研究ではロボットの動きに焦点をあて、ロボットマニピュレータの動作計画を例にとり、人間の受ける心的負担が少なくなるような軌道生成を、行動素アプローチにより行う手法を提案する。

A2. 行動素アプローチ

ロボットマニピュレータの動作計画を行う場合、ロボットマニピュレータの動作に対応した評価関数を定め、その値を最小化する方法がよく用いられる。例えば、仮想的なポテンシャルや消費エネルギー、動作の滑らかさなどが評価関数として用いられ、これらはロボットの関節角度などにより容易に定式化できる。

本研究では、ロボットの作業空間内にいる人間がロボットの動作から受ける心的負担度を評価関数としてロボットの動作計画を行う事を考える。ところが、心的負担度をロボットの関節角度などの物理量を用いて、式で適切に表現することはなかなか難しい。そこで、被験者の生理的反応から心的負担度を見積ることを考える。

まず、一連のロボットマニピュレータの動作を複数の基本動作に分解する。この基本動作を行動素と呼ぶことにする。次に、行動素を被験者に提示し、被験者の生体信号（ここでは心電図）を計測する実験を行う。得られた生体信号から各行動素の心的負担度を見積る。そして、これらの行動素を再結合してロボットマニピュレータの動作を生成する。生成された動作の心的負担度はこれに含まれる行動素の心的負担度の総和とする。このような手法を行動素アプローチと呼ぶことにする。

A3. 心的負担度

本研究では、自律神経活動を調べる手法としてよく知られている心拍変動解析により、心的負担度を評価することにする。具体的には RRV 法と呼ばれる手法を応用し、独自の指標を導入した。

心的負担評価実験において、132 の行動素を 2 名の被験者にそれぞれ提示し、心電図を測定した。これを解析し心的負担度を計算した。

A4. 軌道計画の適用例

実験で被験者に提示した行動素は、 $3 \times 3 \times 2$ の格子点をロボットの手先が直線的に動くもので、移動時間が 2 秒と 4 秒の 2 種類を用意した。ここでは、心的負担の総和が最小となるように、ある始点から出発したロボットの手先が制限時間内に終点へ移動するような、行動素の組合せを見つける軌道計画問題を扱う。この問題は制約条件付きの最短経路問題に帰着でき、ダイクストラ法を応用することで解を見つけることが可能である。本文では、この手法の適用例として、制限時間が無い場合とある場合の結果を示し、考察している。

A5. おわりに

本研究では、ロボットマニピュレータの動作計画を例にとり、人間の受ける心的負担が少なくなるような軌道生成を行動素アプローチにより行う手法を提案した。さらに複数の行動素について、実験により心的負担を評価し、これらの組み合わせで軌道生成が出来ることを示した。

1 はじめに

生産性向上の目的で工場などに導入されている産業用ロボットには、その動作の正確さ、高速性、効率などが要求される。このようなロボットが扱う対象は物であり、人間から隔離された環境で使用されることを前提にしている。

ところが近年、メカトロニクス技術やコンピュータ技術の進歩により、より複雑な機能を持つロボットを作ることが可能になり、さらに、少子高齢化による労働人口不足の観測とあいまって、ロボットを人間の生活空間で利用したいという要求が大きくなっている。すなわちロボットに日常の家事・介護労働を補助させたり、愛玩の対象としたりしようというのである。そのようなロボットは人間と接近した環境で動くことになる。このときロボットが使用者に与える影響は、身体のみならず心理にも及ぶと考えられる。このような心理的影響について調べ、その結果をロボットの動作の生成に活かすことができれば、使用者の心的な快適性を確保することが可能になる。

ロボットが人間に心理的影響を与える要因としては、外見、大きさ、動作音など様々なものが考えられる。本研究ではロボットの動きに焦点をあて、ロボットマニピュレータの動作計画を例にとり、人間の受ける心的負担が少なくなるような軌道生成を、行動素アプローチにより行う手法を提案する。

以下では、まず行動素アプローチについて説明した後、ロボットの動きに対して心的負担を見積る手法について述べる。そして、心的負担評価実験におけるロボットの提示動作について説明し、この実験より得られる心的負担度から軌道生成を行う手法を示す。最後に、手先軌道の生成例を示し、これを考察する。

2 行動素アプローチ

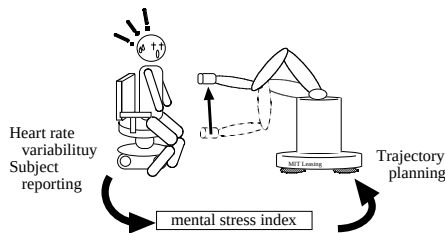


Fig. 1: Scheme of this research

ロボットマニピュレータの動作計画を行う場合、ロボットマニピュレータの動作に対応した評価関数を定め、その値を最小化する方法がよく用いられる。ここで動作計画とは、ロボット手先の経路計画や軌道計画などを含んだ広い意味での計画問題を差す。評価関数としては、仮想的なポテンシャルや消費エネルギー、動作の滑らかさなどがよく用いられる。これらはロボットの関節角度などにより定式化される。

本研究の場合は、評価指標として利用者の心的負担度を用いるが、これを式で適切に表現することはなかなか難しい。そこで、ロボットマニピュレータの動きを実際に被験者に提示し、被験者の生理的反応から心的負担度を見積ることを考える。これにより、ロボットマニピュレータの動作と心的負担を対応付けできると考えた。この概念図を Fig.1 に示す。

このとき、提示する動作が長時間に渡り、その中に複数の動作要素が含まれている場合など、どの要素にどのように反応があったかを生体計測から正確に読み取り、対応付けることは難しい。そこで Fig.2 のように、一連のロボットマニピュレータの動作を複数の基本動作に分解して考えることにする。この基本動作を行動素と呼ぶことにする。

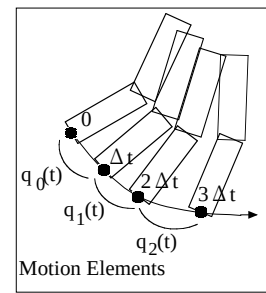


Fig. 2: The image of motion elements

行動素を提示動作として用いれば、それぞれの提示動作と生体信号の反応を対応付けることは容易となる。さらに、生体信号から評価した心的負担度を行動素に対応付けることにより、複数の行動素を再結合してロボットマニピュレータの動作を生成することも可能となる。これを行動素アプローチと呼ぶことにする。

以下の心的負担度評価実験では、数十種類の行動素を被験者へ提示し、それらに対する被験者の生体信号を解析することで心的負担度を見積る。ロボットマニピュレータの軌道計画では、これらの行動素の組み合わせの中から、心的負担度の総和が小さくなるものを選ぶ。

3 心的負担度指標の測定

人間の心理状態を生体信号により解析、評価する方法には様々なものがある。本研究では、自律神経活動を知る上でよく用いられる心拍変動解析を採用する。

心臓の活動電位は、洞房結節から発生した刺激により心筋が収縮することで生ずる。これを身体の適当な 2 点において測定し経時的にプロットしたものが心電図である。心電波形は P,Q,R,S,T 波と呼ばれる特徴を持った波で構成される。特に R 波はインパルス状なのでその出現時刻が読み取り易く、心拍の代表点として利用されている (Fig.3 参照)。この R 波と R 波の時間間隔 (RRI) を心拍間隔とみなし、その変動を解析することを心拍変動解析 (HRV) という。

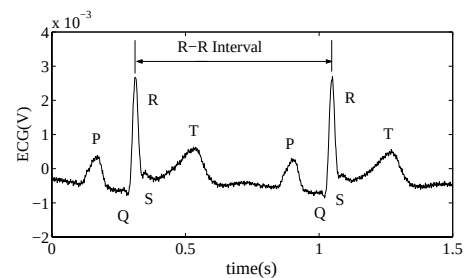


Fig. 3: ECG and R-R interval

RRI 時系列を周波数解析し、パワースペクトルを求めると、0.1Hz 付近と 0.3Hz 付近に大きなピークが表れる。前者は LF (Low Frequency) 成分、後者は HF (High Frequency) 成分と呼ばれる。LF 成分は交感神経活動及び副交感神経活動、HF 成分は副交感神経活動を反映しており、それらの神経活動の指標として用いられる⁽¹⁾。

本研究ではロボットマニピュレータの動作時点における被験者の反応を評価したいのであるから、周波数領域よりも時間領域における解析の方が望ましい。そこで、RRI 時系列に対して移動平均フィルターを適用し、LF 成分、HF 成分をそれぞれ抽出する RRV (R-R variability) 法の適用を考える⁽²⁾。RRV

法によって、HF 成分に対応する時系列データ RRV3 と LF 成分に対応する RRV9 を得ることができる。人が心的ストレスを受けると RRV3 は減少し、RRV9 は増加する傾向があるとされている。RRV3, RRV9 の導出は次の計算による。

$$RRI3(k) = \frac{\sum_{i=-1}^1 RRI(k+i)}{3} \quad (1)$$

$$RRV3(k) = \frac{\sum_{j=0}^2 (RRI(k+j) - RRI3(k+j))^2}{3} \quad (2)$$

$$RRI9(k) = \frac{\sum_{i=-4}^4 RRI(k+i)}{9} \quad (3)$$

$$RRV9(k) = \frac{\sum_{j=0}^8 (RRI3(k+j) - RRI9(k+j))^2}{9} \quad (4)$$

ここで $RRI(k)$ は RRI 時系列である。

本研究では、この二つの指標を組み合わせた RRV93 という指標と、安静時の平均 RRV9 で提示動作時の RRV9 を除した $mRRV$ という指標を導入する。これらは共に、心的負担が生じると増加する指標である。

$$RRV93(k) = \sqrt{\frac{RRV9(k)}{RRV3(k)}}$$

$$mRRV(k) = \frac{RRV9(k)}{\text{mean}(aRRV9)}$$

($aRRV9$ = 安静状態の RRV9 データ)

4 提示動作

次に被験者に提示するロボットマニピュレータの動作について説明する。

まず、被験者の体幹上に z 軸を持つような円筒座標系を考える。被験者の目線の高さを z 軸の原点とし、上向きを正とする。被験者から見て正面が $0[\text{deg}]$ で右方向に正の角度を取る。この円筒座標上に、 $Z = -h, 0, h$, 半径 $r = L_0, L_1$, 角度 $\theta = 0, 30, 60[\text{deg}]$ の場所に格子点を取る。格子点同士を前後上下左右に結ぶすべての直線 (33 本) を考え、これらの線を時間 T かけて一定速度で手先が移動する動作を、ロボットマニピュレータの提示動作とする。

今回の実験では、 h を被験者の目線から胸部までの距離、 $L_0 = 200[\text{mm}]$, $L_1 = 370[\text{mm}]$, $T = 2, 4[\text{s}]$ の 2 種類とした。一直線に対し動作の向きは 2 つ、 T が 2 種類あるので、実験で提示する動作は合計で 132 種類となる。この提示動作の経路を被験者の後上方から見た概念図を Fig.4 に示す。ロボットマニピュレータの原点は円筒座標系で $r = 700[\text{mm}]$, $\theta = 30[\text{deg}]$ の鉛直線上においた。

5 実験環境および実験方法

5.1 実験環境の構成

実験環境を上から見た図を Fig.5 に示す。実験に供したロボットは小型 5 軸ロボットマニピュレータ (三菱電機, RM-501) である。各関節ごとに速度制御型ロボットドライバを配してあり、パーソナルコンピュータ (PC-AT 互換機) からの指令で提示動作を実現できる。ロボットの対面には椅子が置かれており、ここに座った被験者の生体信号を測るための生体アンプ (NEC 三栄, 生体電気用増幅ユニット, 4124) が被験者の背後に置かれている。心電図計測の電極配置は、被験者の動作が心電図に反映しないよう、両肩 (鎖骨の外側端付近) と左足首の 3 点とした。電極はディスプレイ電極を用い、その粘着力により電極を皮膚にしっかり固定した。心電図とあわせて呼吸曲線も計測した。呼吸曲線は伸縮性のチューブを被験者の胸部に紐でくりつけ、その変形量を計測した。電極で計測された信号は生体アンプで増幅後、パーソナルコンピュータにおいてサンプリング周波数 1 kHz で AD 変換され、ハードディスクに保存される (AD/DA コンバータ PCI-9112+PC-AT 互換機)。

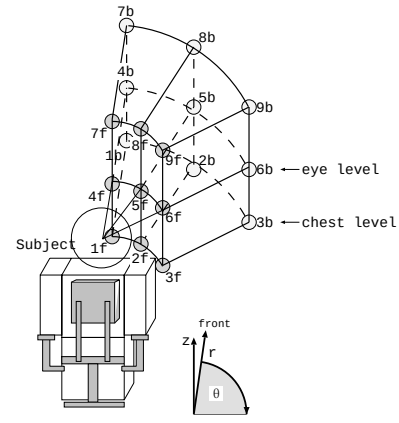


Fig. 4: The tip path of robot manipulator presented to subjects

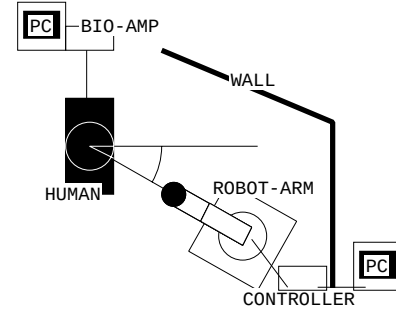


Fig. 5: Top view of the experiment environment

5.2 実験方法

被験者は健康な男子 2 名で、年齢はそれぞれ 22, 23 歳であった。自律神経活動をできるだけ基礎レベルにするため、実験前は、運動、喫煙、アルコール及びカフェインの摂取をさけてもらった。実験中は椅子に静かに腰かけて、1 分あたり 15 回のリズムにあわせて呼吸を調整してもらった。実験室は換気を行い、室温を摂氏 23 度前後に設定した。

実験の流れを Fig.6 に示す。ロボットに慣れていない被験者の場合、実験開始直後の時間帯は、ロボットそれ自身に対する精神的緊張により自律神経活動が影響を受ける可能性がある。そこで、実験に入るにあたり、ロボットの動きを見せる 5 分間のデモンストレーションを行った。次に座位のまま安静にもらい、その 10 分後に計測を始めた。計測開始 2 分後、すなわち安静状態に入った 12 分後から、1 分間に 1 パターンずつロボットの動作提示を行なった。1 セットの実験で 18 パターンの動作を提示したので、動作提示中の計測は全部で 18 分間、結局、計測時間は全部で 20 分間となる。各提示動作が行なわれる 10 秒前にパーソナルコンピュータによりピープ音を鳴らし、ロボットの動きに注目するように被験者に促した。そのとき以外はロボットから視点をそらしても構わないと告げた。ロボットの動作提示後の任意の時刻に、被験者にその動作の心的負担度を 5 段階で評価してもらった。その時の評価のカテゴリーを以下に示す。

1. ぜんぜんびっくりしなかった
2. ちょっとびっくりしなかった
3. びっくりした
4. すごくびっくりした
5. ものすごくびっくりした

以上を数日間に分けて 8 セット行った。1 セットの実験で提示する 18 パターンのロボットの動作は、ちょうど一筆書きで描けるような組合せにした。また、各セットの最初の 2 パターンの動作の経路は全て共通なものとした。以下では、2 名の被験者をそれぞれ被験者 A、被験者 B と呼ぶことにする。

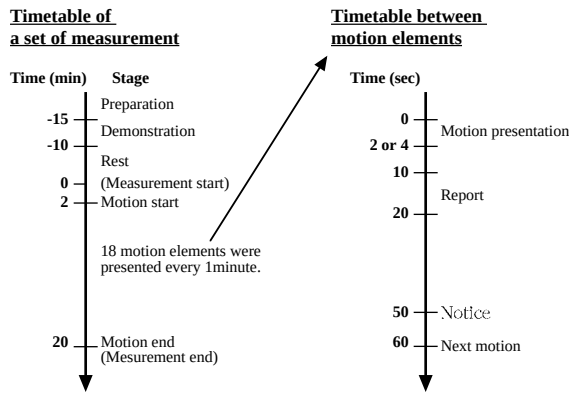


Fig. 6: Timetable of a set of experiment

6 実験結果と考察

6.1 RRV 解析結果

全ての実験結果から RRV3, RRV9 を算出した. その一例を Fig.7 に示す. グラフに引かれている縦の実線は, ロボットの動作時点を意味する.

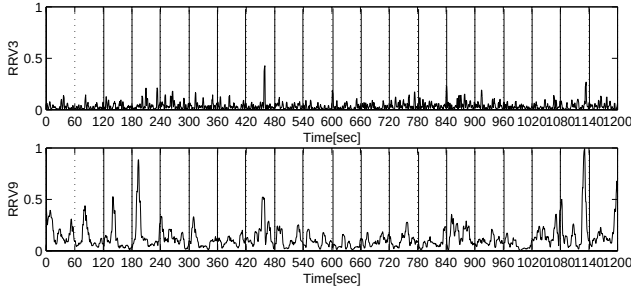


Fig. 7: RRV3 and RRV9 time series data of subject A for a presented motion

RRV3 のグラフではロボットの提示動作に関連した変動が観測できなかった. 一方 RRV9 のグラフでは初期の時間帯で, 提示動作に関連する変動が大きく出ている. ただし, RRV9 の後半の時間帯では, このような変動が見られなくなっている. これは, 実験が長時間に渡ったため, 被験者の疲労が蓄積し, 集中力が散漫になったことによる影響が現れたものと考えられる.

6.2 心的負担度の評価

Fig.7 から, 動作提示後の RRV の反応は, 動作提示後の十数秒間に現れているように見える. これを確かめるために, 提示動作後 1 分間の RRV を全提示動作にわたって平均してみた. すなわち提示動作に番号を付し, n 番目の提示動作に対する RRV を $RRV_n(t)$ ($0 \leq t < 60$) とし, 提示動作が全部で N 個あったとすると, この平均値は次式のように計算される.

$$\frac{\sum_n RRV_n(t)}{N} \quad (5)$$

それぞれ被験者 A, B の RRV3, RRV9 について計算した結果を Fig.8, 9, 10, 11 に示す. 被験者 A の RRV9 を見ると動作提示後に大きな変動があり, 約 10 秒後にピークに達している. 50 秒の時点の大きな変動は予告音 (ピープ音) によるものと考えられる. RRV3 については RRV9 に比べ目立った反応は見られなかった. 被験者 B の RRV9 も同様の特徴が見られている. 被験者 B の RRV3 は被験者 A と違い, 提示動作に対する変動が顕著に出ている.

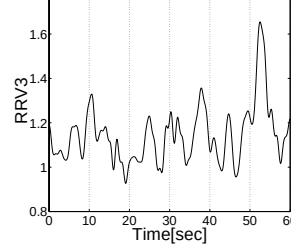


Fig. 8: Average time series of RRV3 over whole motions of subject A

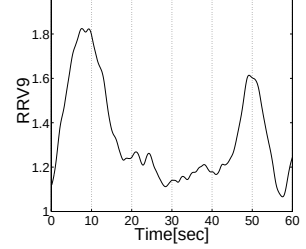


Fig. 9: Average time series of RRV9 over whole motions of subject A

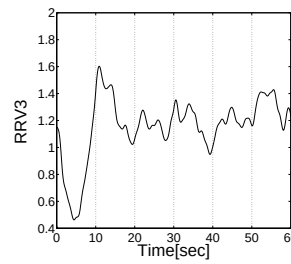


Fig. 10: Average time series of RRV3 over whole motions of subject B

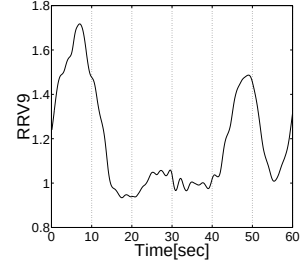


Fig. 11: Average time series of RRV9 over whole motions of subject B

以上より被験者 A, B ともに動作提示後約 10 秒間にわたり大きな変動が表れる傾向があることがわかった. そこで, n 番目の提示動作に対する心的負担度 MSI_n を, 動作提示開始時刻 t_n から 15 秒の間, 心的負担の指標 RRV93 あるいは mRRV を積分して見積ることとする. このとき, 数値積分は台形近似積分により行った.

$$MSI_n(RRV93) = \int_{t_n}^{t_n+15} RRV93(t)dt \quad (6)$$

$$MSI_n(mRRV) = \int_{t_n}^{t_n+15} mRRV(t)dt \quad (7)$$

6.3 心的負担度と主観評価の関係について

上で定義した心的負担度 MSI と被験者の主観評価の間の相関係数を調べた. これを Table 1 に示す. 主観評価とそれぞれ $MSI(RRV93)$, $MSI(mRRV)$ の間には正の相関があると予想したが, 相関係数の値を見ると両者の間には相関がほとんどないといえる. これに関してははっきりした理由は調査中であるが, 心的負担を見積る場合には生理信号だけに頼らずに, 主観評価などの他の指標も併用すべきという示唆を読み取る.

Table 1: correlation coefficients between MSIs and subject reporting

Subject	$MSI(RRV93)$	$MSI(mRRV)$
A	0.0303	0.0883
B	0.0343	0.0564

7 軌道計画の方法と適用例

次に, 心的負担度が求められた行動素を組み合わせる, ロボットマニピュレータの軌道を生成する方法を考える.

心的負担度の総和が最小となるような行動素の組み合わせを求める問題は最短経路問題に帰着することが可能である。すなわち心的負担を最短経路問題における距離と捉えればよい。最短経路問題を解くアルゴリズムにはよく知られたダイクストラ法を利用できる⁽³⁾。ただし、ここでは1区間の移動経路に移動時間が異なる2つ行動素が設定されていて、標準的な最短経路問題と異なる。

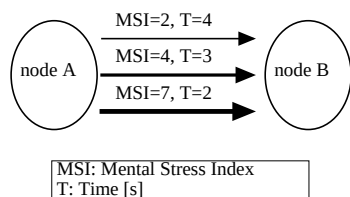


Fig. 12: A simple illustrative problem for the proposed method

そこで予め、始点から目標点まで移動できるような経路の中で、制限時間内に収まるものをすべて列挙し、それらについてダイクストラ法を適用した。たとえば、Fig.12でAからBまで行くための最短経路を制限時間3秒で求めるとする。この中で制限時間3秒以内であるものはAからBへ2秒で移動する経路と3秒のそれである。よってこの中で最も心的負担度が少なくなる、AからBへ3秒で移動する経路が選択される。

7.1 結果と考察

実験結果の解析から得られた心的負担度を使って実際に軌道生成した。制限時間が無い場合の実行例をFig.13, 14に、8秒とした場合の実行例をFig.15, 16に示す。心的負担度としてはmRRVによるMSIを用いた。また、図中のねずみ色の矢印は2秒の行動素であり、黒いものは4秒の行動素である。

軌道生成の結果、被験者の目の前で縦に動く行動素は選択されることが分った。実際、ロボットマニピュレータの動きを見ると、縦の動きが速く、被験者を驚かせていたようだった。よって、被験者から離れたところで縦に動き、その後被験者に近づいてくるような経路が選択されたと思われる。

また、Fig.14に注目すると、最短経路で始点から終点まで移動するよりも、遠回りをしたほうが心的負担度が小さいという結果となった。これは、被験者に正面から向かっていく動作に対する心的負担度が大きく、遠回りをしたほうがストレスを与えないという結果の一例となった。一方、始点と終点がFig.14と等しいが、制限時間のあるFig.16を見ると、制限時間の制約のために遠回りをする経路は選択されなかった。

8 おわりに

本研究では、ロボットマニピュレータの動作計画を例にとり、人間の受ける心的負担が少なくなるような軌道生成を行動素アプローチにより行う手法を提案した。さらに複数の行動素について、実験により心的負担を評価し、これらの組み合わせで軌道生成が出来ることを示した。

もし、制限時間を厳しく設ければ、ストレスを人間が感じるような動きになるものの、短い時間で目的位置まで到達することが出来る。よって制限時間を臨機応変にロボットが選択できるならば、人の近くにいる場合の動作とそうでない場合を考慮した、効率の良い動きをロボットマニピュレータに与えることも可能であると思われる。

現段階では、実験に供した提示動作数が少ないため、動きの粗い軌道しか生成できないが、今後その数を増やせば、より細かい動きも実現できると考えられる。また、実験で提示動作として採用しなかった行動素に対しても、心的負担度を推定できるような手段の開発も望まれる。

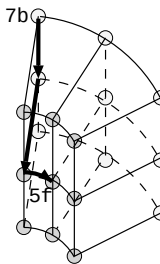


Fig. 13: Searched path from 7b to 5f without a time limit.

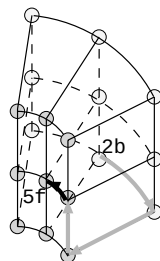


Fig. 14: Searched path from 2b to 5f without a time limit.

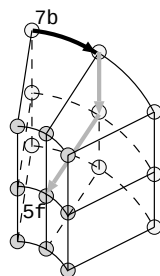


Fig. 15: Searched path from 7b to 5f with a time limit of 8 seconds.

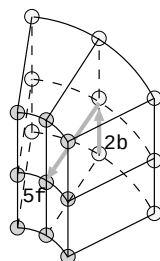


Fig. 16: Searched path from 2b to 5f with a time limit of 8 seconds.

参考文献

- (1) 早野順一郎:心拍のゆらぎと自律神経, 第11回循環器疾患の成因に関する研究会(1996)
- (2) 栗谷川幸代, 景山一郎:機械操作時における心負担推定に用いる心拍変動モデルの構築:日本機械学会論文集(C編), Vol.66, No.643(2000)
- (3) 伊理正夫, 藤重悟, 大山達雄:グラフ・ネットワーク・マトロイド:産業図書
- (4) 茨木俊秀:組合せ最適化-分枝限定法を中心として:産業図書
- (5) ムーブマスター(II) RM-501型 本体取扱説明書